تعیین پارامترهای موثر جهت بررسی تغییرات سکوی ساحلی در شرایط غیر طوفانی با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین

سهیل عطائی[۱] ، مهدی عجمی[۲*] ، سعید قره چلو[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei.h.s@shahroodut.ac.ir
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، adjami@shahroodut.ac.ir
[۳] استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، sgharachelo@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

کلمات کلیدی:
رفتار ساحل
سکوی ساحلی
شرایط غیر طوفانی
یادگیری ماشین
درخت تصمیم رگرسیونی

چکیده

با پیشرفت یادگیری ماشین و الگوریتم‌ها و احداث سایت‌های تحقیقاتی در مناطق ساحلی، اطلاعات ارزشمندی در دسترس قرار گرفته که می‌توان از آنها در توسعه مهندسی سواحل بهره برد. در این پژوهش سعی شده است تا با یادگیری ماشین، ناحیه ساحلی نارابیین استرالیا با رویکرد جدیدی بررسی گردد. یکی از مهمترین عوامل در شناخت رفتار ساحل، بازسازی خود در شرایط غیر طوفانی و بلند مدت است. شناخت و توصیف پدیده‌های تاثیرگذار بر عملکرد تعادلی ساحل نیز بسیار با اهمیت می‌باشد. پس از مرتب سازی داده‌های اولیه، به کمک الگوریتم درخت تصمیم رگرسیونی با بررسی بهترین الگوی رفتاری از برآیند دو عامل خطا و پیچیدگی مدل، مناسب‌ترین سناریوها جهت توصیف پارامترهای اثرگذار بر توابع هدف (تغییرات خط ساحل و هندسه سکوی ساحلی) انتخاب گردیدند. بر این اساس جهت توصیف تغییرات خط ساحل به ترتیب ΔBW، Berm Slope، SLR و ζ با مقادیر R^2=82% و RMSE=3.489 متر؛ جهت توصیف تغییرات ارتفاعی سکوی ساحلی به ترتیب BC Height، Δx Shoreline، Δx BC و P با مقادیر R^2=48% و RMSE=0.397 متر و همچنین جهت توصیف موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی BW، Berm Slope، Δy BC، BC Height، E و SLR با مقادیر R^2=67% و RMSE=9.807 متر در نظر گرفته شدند. بر طبق نتایج حاصل از توصیفِ و نیز اثرگذاری پدیده‌های هیدرودینامیک و مورفودینامیک با استفاده از روش درخت تصمیم رگرسیونی و مقادیر خطا و ضریب تعیین بدست آمده، می‌توان بیان نمود که این روش مناسب بوده و در شناخت پدیده‌های حاکم بر عارضه‌های ساحلی قابل اعتماد است؛ بر این اساس جهت بررسی تغییرات مورفودینامیک سکوی ساحلی و شناخت رفتار تعادلی آن، شکل هندسی و شیب اولیه آن نقش بسزایی را ایفا می‌نماید.

Determining the Effective Parameters to Investigate the Coastal Berm Changes in non-Stormy Conditions Using a Machine Learning Algorithm

Soheil Ataei[1], Mehdi Adjami[2*], Saeid Gharechelou[3]

[1] Ph.D. student, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; ataei.h.s@shahroodut.ac.ir
[2] Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; adjami@shahroodut.ac.ir
[3] Assistant Professor, Department of Geotechnical and Transport Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran; sgharachelo@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 12 Sep 2024
Accepted: 14 Dec 2024
Available online: 14 Dec 2024

Keywords:
Beach Behavior
Coastal Berm
Non-Storm Conditions
Machine Learning

ABSTRACT

With the advancement of machine learning and algorithms and the establishment of research sites in coastal areas, valuable information has become available that can be utilized in the development of coastal engineering. This study attempts to examine the coastal area of Narrabeen, Australia with a new approach using machine learning. One of the most important factors in understanding coastal behavior is its self-reconstruction under non-stormy and long-term conditions. Recognizing and describing the phenomena affecting the equilibrium performance of the coast is also of great significance. After sorting the initial data, the best behavioral pattern was examined using a regression decision tree algorithm by evaluating the combination of

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

error and model complexity, and the most appropriate scenarios were selected to describe the influencing parameters on objective functions (shoreline changes and coastal platform geometry). Accordingly, to describe shoreline changes, ΔBW, Berm Slope, SLR, and ζ were considered with values of R^2=82% and RMSE=3.489 meters; to describe changes in the elevation of the coastal platform, BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, and P were considered with values of R^2=48% and RMSE=0.397 meters; and to describe the horizontal position of the coastal platform crest, BW, Berm Slope, Δy BC, BC Height, E, and SLR were considered with values of R^2=67% and RMSE=9.807 meters. According to the results of the description and the impact of hydrodynamic and morphodynamic phenomena using the regression decision tree method and the obtained error values and coefficient of determination, it can be stated that this method is suitable and reliable for understanding the governing phenomena on coastal features; Based on this, in order to investigate the morphodynamic changes of the coastal platform and to understand its equilibrium behavior, its geometric shape and initial slope play a significant role.

Regression Decision Tree

۱ - مقدمه

مطالعات ناحیه ساحلی، شامل بخش‌هایی چون امواج، جریانات ساحلی، انتقال رسوب، نیمرخ‌های ساحلی و بطور کلی تغییرات و فعل و انفعالات هیدرودینامیک و مورفودینامیک ساحلی می‌باشد. با توجه به اینکه مناطق ساحلی جهت بهره‌برداری‌های اقتصادی و توریستی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مطالعات و شناخت این ناحیه بسیار مهم و ارزشمند خواهد بود؛ از این روی، مطالعات بسیاری توسط محققین انجام پذیرفته که خود بیانگر اهمیت شناخت این نواحی می‌باشد. پاپروتنی و همکارانش [۱] در مطالعه‌ی خود تأثیر فرسایش ساحل بر عملکرد اکوسیستم ایجاد شده توسط ساحل‌های شنی در اروپا را بررسی کردند. این مطالعه، کاهش عملکرد اکوسیستم موجود در منطقه در شرایط افزایش تراز دریا و فرسایش ساحل را بر اساس داده‌های تاریخی و پیش‌بینی آنها در چارچوب سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. فلور و همکارانش [۲] در کار خود تغییرات ژئومورفولوژی در ۱۵ ساحل ماسه‌ای در آستوریاس[1] اسپانیا، از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۴ را تحلیل نمودند و افزایش وقوع طوفان‌های قوی با ارتفاع موج بزرگ‌تر از ۹ متر و تغییر در جهت وقوع آنها را به عنوان عامل اصلی فرسایش شدید سواحل ماسه‌ای و تپه‌های ماسه ای شناسایی کردند. هارلی و همکارانش [۳] سه مجموعه داده مورفولوژیک با رزولوشن بالا حاصل از وقوع توفان‌های شدید پی در پی از استرالیا، انگلیس و مکزیک را تحلیل کرده‌اند تا بودجه رسوبات نزدیک به ساحل را اندازه‌گیری کرده و این تغییرات حجمی را با پیش‌بینی‌های بلندمدت ارتباط دهند. گراسمن و همکارانش [۴] آزمایش‌های بزرگ مقیاس در مورد تأثیر شرایط امواج بر شکل گیری ساحل تعادلی را انجام داده‌اند. همینوی و همکارانش [۵] در کارهای خود از مدل عددی استفاده نموده تا پیش‌بینی کنند که چگونه تپه های ماسه‌ای با افزایش سطح دریا و تغییر در شدت توفان‌ها، تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند.

پیشرفت علم یادگیری ماشین و همچنین توسعه الگوریتم‌ها در مجاورت سایر روش‌های علمی همچون روش‌های آزمایشگاهی و عددی، به توسعه و شناخت هرچه بیشتر نواحی ساحلی کمک شایانی نموده است. همچنین با احداث سایت‌های تحقیقاتی و جمع آوری بلند مدت داده‌های محیطی و میدانی در مناطق ساحلی در بسیاری از کشورها طی سالیان گذشته، که امروزه نیز ادامه دارد، مجموعه‌ای از اطلاعات ارزشمند علمی در دسترس است که می‌توان از آنها در پیشبرد اهداف علم سواحل بهره برد. یین و همکارانش [۶] سه مدل، شامل مدل Auto-regressive Integrated Moving Average فصلی، مدل Neural Network Auto-Regression و مدل Long Short-Term Memory، را با مدل تابع ارتوگونال تجربی برای تغییرات ساحلی در منطقه نهاترانگ[2] مقایسه کردند. نتایج نشان داد که هر سه مدل نسبت به مدل تابع ارتوگونال تجربی در پیش‌بینیِ دقیقِ تغییرات ساحلی عملکرد بهتری داشتند و پیش‌بینی آن‌ها در حالت‌های بلندمدت و کوتاه مدت، مقایسه پذیر بود. رودریگوئز و همکارانش [۷] در تحقیق خود از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای مطالعه نرخ‌های فرسایش و رسوب‌گذاری سواحل در آندلوسیا[3] اسپانیا از سال ۱۹۵۶ تا ۲۰۱۱ استفاده نمودند. این تحقیق سواحل را بر اساس الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری آن‌ها به چهار گروه تقسیم می‌کند و مقادیر آستانه حرکت برای این الگوها را با استفاده از درخت طبقه‌بندی و رگرسیون، مشخص نموده است. سنچال و همکارانش [۸] در تحقیقات خود به کمک توسعه شبکه‌های عصبی مصنوعی متوجه شده‌اند که اضافه نمودنِ موقعیتِ اولین شکستِ امواج، عملکردِ پیش بینیِ خطِ ساحل را بهبود می‌بخشد، در حالی که اضافه نمودن پارامتر جزر و مد، پیش بینی را تضعیف می‌کند. لاپنا و همکارانش [۹] در تحقیقات خود بیان نموده‌اند که مدل یادگیری عمیق می‌تواند نسبت به مدل‌های عددی فعلی، به صورت دقیق‌تر تغییرات سالانه خط ساحلی را که توسط امواج هدایت می‌شوند،

[1] Asturias

[2] Nha Trang

[3] Andalusia

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

پیش‌بینی نماید. گلدشتین و همکارانش [۱۰] و بیوزن و اسپلینتر [۱۱] مقاله‌ای مروری در خصوص کاربردهای یادگیری ماشین در مطالعات فرایندهای ناحیه ساحلی ارائه دادند؛ همچنین، در ارتباط با مطالعات ساحلی به کمک الگوریتم‌ها پژوهش‌های دیگری نیز انجام گرفته است [۲۱-۱۲].

ساحل ماسه‌ای نارابین[4]واقع در شمال ساحل سیدنی در جنوب شرقی استرالیا یکی از پایگاه‌های داده‌ای مهم و ارزشمند است که محققین از سال ۱۹۷۶ تا پایان ۲۰۱۹ در حال جمع‌آوری داده‌های مرتبط با مهندسی سواحل در ناحیه کم عمق و نوار ساحلی بوده‌اند [۲۲]. به کمک این پایگاه داده، کارهای تحقیقاتی قابل توجهی انجام شده است [۲۶-۲۲]. همچنین طی سال‌های اخیر، مطالعاتی به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین با استفاده از این داده‌ها انجام پذیرفته که بیشتر متمرکز بر وقایع طوفانی بوده و به توصیف و پیش‌بینی پارامترهای مورفودینامیک ساحلی و همچنین تغییرات خط ساحل می‌پردازد. بیوزن و همکارانش [۲۷] در مطالعه‌ی خود در خصوص پیش‌بینی فرسایش خط ساحل نارابین ناشی از رویدادهای توفانی، توانایی توسعه دو شبکه بیزینِ مختلفِ بهینه‌سازی شده برای مهارت‌های پیش‌بینی و توصیف را نشان دادند. برطبق نتایج، شبکه بیزین جهت پیش‌بینی از ۳ گره تشکیل شده و به میزان ۶۵٪ توانایی مهارتی داشت، در حالی که شبکه بیزینِ توصیف‌گر، از ۵ گره تشکیل شده و ۸۸٪ از مجموعه داده آموزشی را تولید نمود. زینالی و همکارانش [۲۸] در تحقیقات خود از شبکه عصبی مصنوعی بازگشتی جهت مدل‌سازی تغییرات ساحلی در ساحل نارابین از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ استفاده کردند و نتایج را با روش‌های دیگر مقایسه نمودند. آنها بیان نمودند که روش‌های NARNET و NARXNET به دلیل عملکرد قابل اعتماد در پیش‌بینی تغییرات خط ساحل بر اساس داده‌های تاریخی، برتری دارند. تحقیقات دیگری نیز در این زمینه انجام پذیرفته است [۳۱-۲۹].

در این تحقیق سعی شده است تا با کمک روش یادگیری ماشین، تحلیل ناحیه ساحلی منطقه نارابین با رویکرد جدیدی مورد بررسی قرار گیرد. یکی از مهمترین عوامل در شناخت رفتار ساحل، موقعیت آن در شرایط طوفانی نبوده، بلکه عملکرد ساحل در بازسازی خود پس از وقوع طوفان می‌باشد که می‌توان آن را با مفهوم رفتار تعادلی ساحل[5]بیان نمود؛ که بر اساس مرور انجام پذیرفته بر تحقیقات دیگران، این مساله کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، شناخت و توصیف پدیده‌های (پارامترهای) حاکم و تاثیرگذار بر عملکرد تعادلی ساحل نیز بسیار با اهمیت است. با توجه به اینکه خط ساحل در بحرانی‌ترین ناحیه تغییرات ساحلی بوده و در واقع مرز اصلی بین خشکی و دریا می‌باشد، در گام اول، تغییرات خط ساحلی و سپس تغییرات سکوی ساحلی[6] بررسی شده است. مشخص نمودن موقعیت این ناحیه در تعیین چهره ساحل[7]نقش پراهمیتی دارد و می‌توان به کمک آن ناحیه شستگی[8]را مشخص نمود. بر این اساس پس از مرتب سازی داده‌های اولیه امواج و نیمرخ‌ها و سپس تولید سایر پارامترهای مورفودینامیک و هیدرودینامیک، به کمک الگوریتم درخت تصمیم رگرسیونی به روش Wrapper Backward Selection به توصیف پدیده‌های حاکم پرداخته شده است.

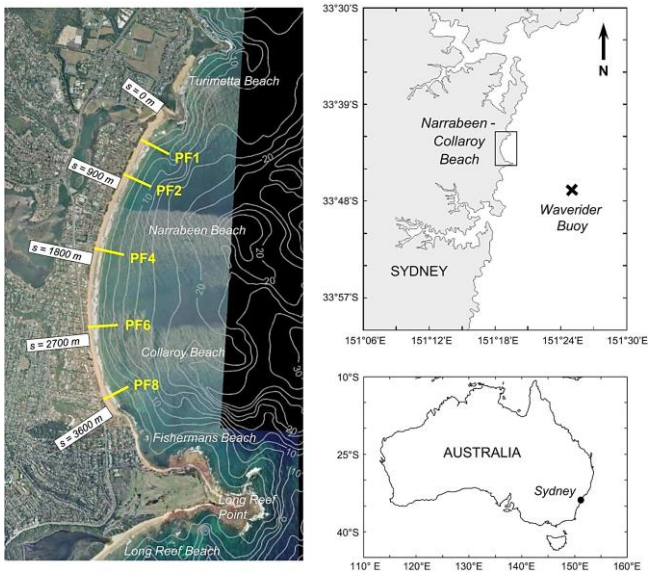
۲ – مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه ساحل ماسه ای نارابین-کولاروی با طول ۳٫۶ کیلومتر در سواحل شمالی شهر سیدنی واقع شده است. در میان افراد محلی بخش شمالی ساحل ماسه‌ای که در سرتاسر این حوضه جای گرفته است به نام ساحل نارابین، بخش جنوبی به نام ساحل کلاروی و بخش کوچکی از آن که مجاور دماغه‌ها در انتهای جنوبی قرار دارد، به ساحل فیشرمن معروف است. ساحل دارای دانه‌بندی نسبتاً یکنواختی با ماسه کوارتزی ریز تا متوسط ($D50\cong0.3$ میلی‌متر) است. حضور دماغه‌ها در دو طرف و انحنای حوضه ساحلی باعث تغییر قابل مشاهده‌ای در انرژی موج در سراسر خط ساحلی می‌شود. معمولا شرایط ساحلی در شمال از نوع dissipative-intermediate است و با حرکت به سمت جنوب به حالت کم انرژی و intermediate-reflective تغییر می‌کند. در انتهای شمالی نارابین، حالت bar-beach یا bar-rip intermediate را نشان می‌دهد. همچنین سکوی ساحلی آن می‌تواند تا عرض ۸۰ متر رسیده و در انتهای آن تپه ماسه‌ای تا ارتفاع ۹ متر بالاتر از میانگین سطح دریا واقع شده است. از سوی دیگر، انتهای جنوبی ساحل با نفوذ توسعه‌ی شهری روبه‌رو شده است که منجر به شکل گیری تپه ماسه‌ای کوتاه‌تری با ارتفاع ۳ تا ۴ متر می‌شود. ساحل در این ناحیه شامل یک سکوی ماسه‌ای است که می‌تواند در عرض تا ۶۰ متر متغیر باشد و دارای سیستم تک پشته‌ای است که تمایل به تشکیل تراس‌های با انرژی پایین‌تر و جزر کم و ساحل انعکاسی دارد [۲۲]. در شکل ۱ موقعیت ساحل نارابین، نیمرخ‌ها و موقعیت بویه ثبت امواج نشان داده شده است.

[4] Narrabeen
[5] Equilibrium behavior of the beach
[6] Coastal Berm
[7] Shoreface
[8] Swash

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

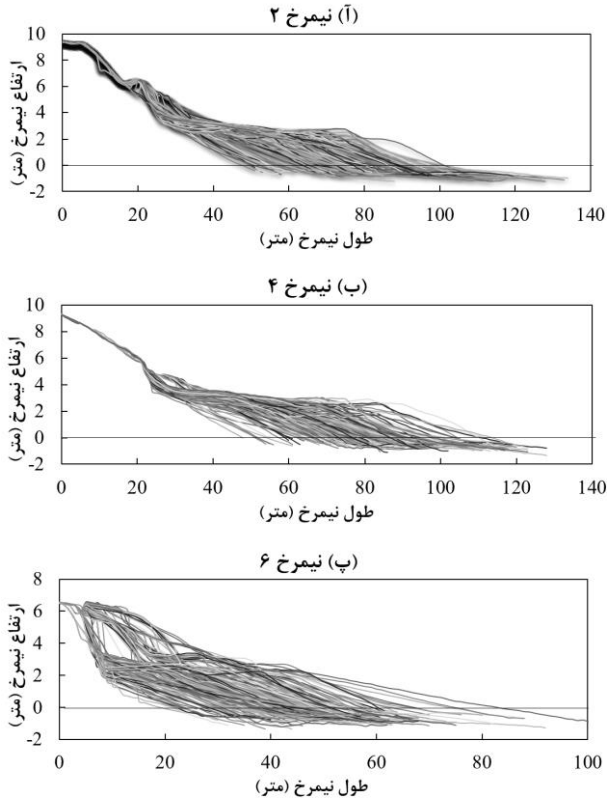


شکل ۱- موقعیت ساحل نارابین، نیمرخ‌ها و موقعیت بویه [۲۲]

۲-۲- انتخاب داده‌ها

در منطقه مورد مطالعه، نیمرخ‌های عرضی در ۵ خط از سال ۱۹۷۶ بصورت ماهانه با فواصل اندازه‌گیری ۱۰ متر برای هر نیمرخ اندازه‌گیری و ثبت شدند. از اواسط سال ۲۰۰۵ دقت اندازه‌گیری نیمرخ‌های ساحلی به یک متر افزایش یافت و تعداد ثبت داده‌ها در هر ماه بیش از یک بار شد. این داده‌ها تا پایان سال ۲۰۱۹ ثبت شدند. در این پژوهش از داده‌ها در بازه سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ (۱۴ سال) که دقت اندازه‌گیری بالاتری داشتند، استفاده شده است. به دلیل کاهش خطا، دوری از دماغه‌های صخره‌ای و تغییر الگوی خطوط اورتوگونال در بخش شمالی و جنوبی، نیمرخ‌های شماره ۲، ۴ و ۶ مورد استفاده قرار گرفتند. نیمرخ‌ها به فاصله ۹۰۰ متر از یکدیگر قرار دارند. اندازه‌گیری نیمرخ‌ها بصورت ماهانه و گاها چندین بار در هر ماه انجام پذیرفته و از ارتفاع تقریبی ۹ متر بالاتر از تراز آب و تا عمق ۱ متری ادامه پیدا کرده است. مجموعه نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده در بازه سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه داده‌های آب و هوایی محلی در منطقه مورد نظر تا سال ۲۰۱۴ موجود بود، داده‌های مربوط به امواج در محدوده بویه آب عمیق که موقعیت آن در شکل ۱ نشان داده شده است، از پایگاه داده‌ای European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)[9] استخراج گردید. با توجه به مشخص بودن مختصات بویه، یکی از گره های مرز تعیین سطح دریافت داده ها در ECMWF مختصات بویه در نظر گرفته شد و داده ها نیز با دقت ۰,۲۵ استخراج شد؛ و همچنین داده‌های مربوط به تغییرات تراز آب دریا نیز از پایگاه AVISO[1] استخراج گردیده است. داده‌های امواج، شامل ارتفاع موج مشخصه و پریود موج حداکثر، در عمق ۸۰ متری (محل بویه) از سری داده‌های ERA5 بصورت ساعتی از سال ۲۰۰۶ تا پایان ۲۰۱۹ استخراج گردیده است.



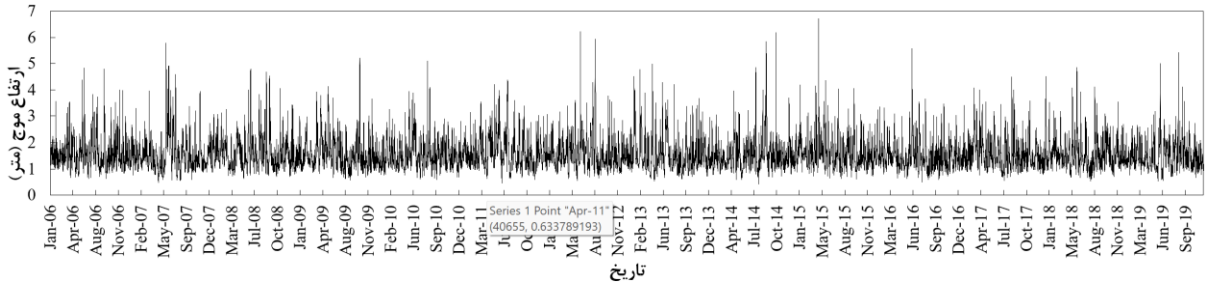
شکل ۲- نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده از ساحل نارابیین در بازه سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹؛ آ. نیمرخ‌های شماره ۲؛ ب. نیمرخ‌های شماره ۴؛ پ. نیمرخ‌های شماره ۶

سری زمانی این داده‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع موج بین ۵,۷۲-۴۸.۰ متر و پریود بین ۳,۲۴-۱۸,۶۲ ثانیه می‌باشد. همچنین، سری زمانی تغییرات تراز آب دریا که در شکل ۵ نشان داده شده است، بر مبنای تغییرات تراز سطح آب دریاهای آزاد از سال ۱۹۹۳ (شروع مطالعات) و تراز MSL می‌باشد که تحت تاثیر تغییرات اقلیمی، گرمایش جهانی، ذوب شدن یخ‌های قطبی و نیز پدیده‌هایی مانند ال‌نینو بوده که از مجموعه پایگاه داده‌ای AVISO در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا پایان ۲۰۱۹ دریافت شده است.

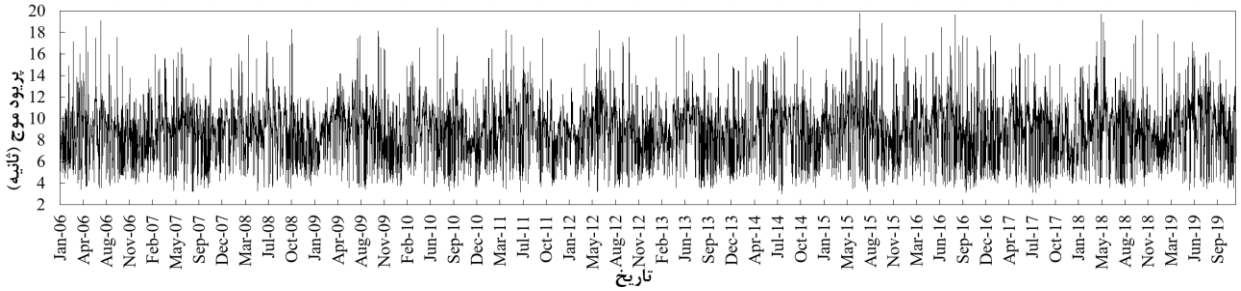
به دلیل حذف اثرات زاویه برخورد امواج و نزدیکی و هم راستایی بهتر خطوط اورتوگونال با تراز بستر، مطلوب است که داده‌های امواج در نزدیکی محل برداشت نیمرخ‌ها در نظر گرفته شوند. جهت انتقال داده‌های امواج از آب عمیق به محل هر یک از خطوط برداشت نیمرخ‌ها در عمق ۱۰ متر، با استفاده از مدل کد باز انتقال امواج نرم افزار SWAN که برای ساحل مورد مطالعه، ارزیابی و صحت سنجی شده، استفاده شده است [۲۲].

[9] https://www.ecmwf.int/ - 2023
[1] https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html - 2023

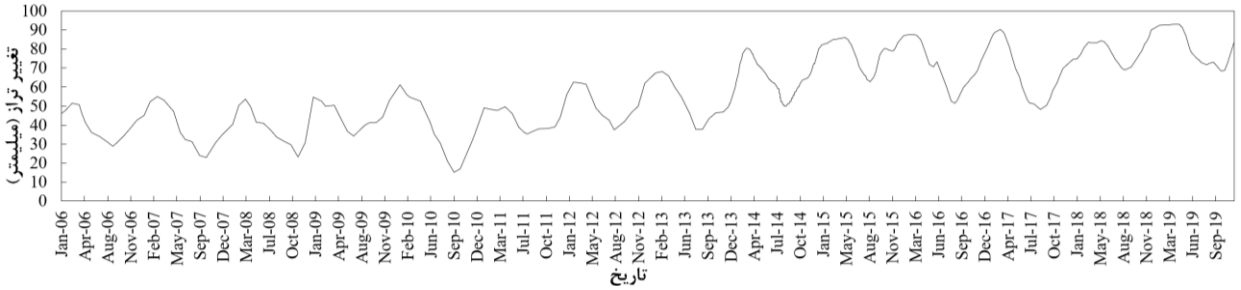
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]



شکل ۳- سری زمانی ارتفاع موج مشخصه در موقعیت بویه



شکل ۴- سری زمانی پریود موج حداکثر در موقعیت بویه



شکل ۵- سری زمانی تغییر تراز آب دریای آزاد

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق بررسی رفتار تعادلی ساحل (عملکرد ساحل در بازسازی خود پس از وقوع طوفان) می‌باشد، بنابراین نیمرخ‌های طوفانی به عنوان شرایط گمراه کننده در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس از تعداد ۹۶۰ داده ثبت شده نیمرخ‌ها، ۷۳ نیمرخ که نشان دهنده شرایط طوفانی شدید بوده از سری داده‌ها حذف گردید و در نهایت ۸۸۷ نیمرخ در بازه سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از داده‌های اولیه امواج و نیمرخ‌های اندازه‌گیری شده، تمامی پارامترهای محیطی قابل تعریف (پارامترهای مستقل و وابسته) استخراج و در دو گروه داده‌های هیدرودینامیک و مورفودینامیک دسته‌بندی شده است. در شکل ۶ نیمرخ شماتیک عرضی ساحلی و پارامترهای مرتبط با آن و همچنین دسته بندی داده‌های هیدرودینامیک و مورفودینامیک نشان داده شده است.

۲-۳- داده کاوی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین

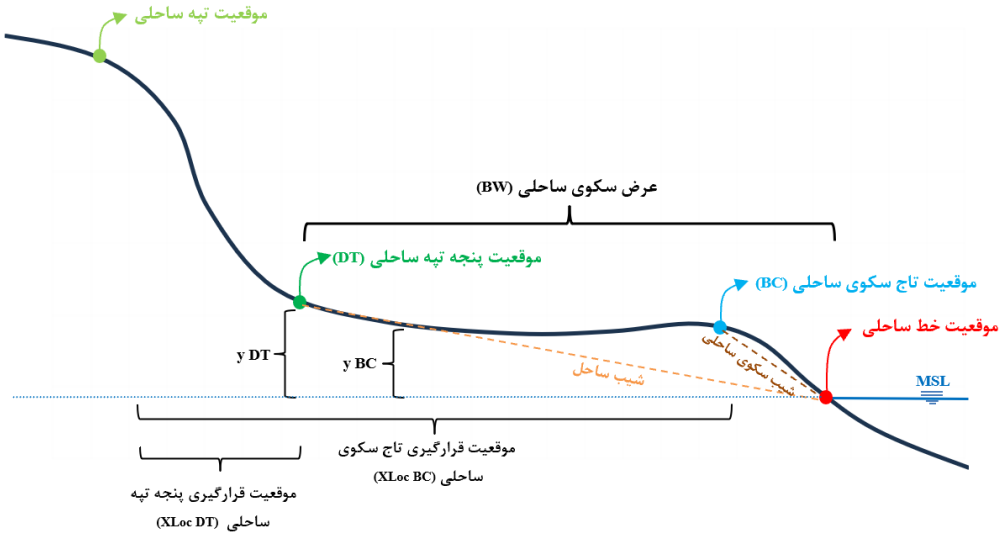
با توجه به ساختار پارامترهای مورد استفاده و ماهیت پیوسته بودن آنها و همچنین توانایی الگوریتم‌ها جهت تحلیل این نوع از داده‌ها، در این پژوهش جهت طبقه بندی پارامترهای محیطی موثر از الگوریتم درخت تصمیم رگرسیونی خطی استفاده شده است. با توجه به پیوسته بودن داده‌ها (نیاز به الگوریتمی که مقادیر توابع هدف را تخمین زده) و همچنین هدف این تحقیق که تفسیر میزان نقش اثرگذاری هر تابع محیطی می‌باشد (طبقه بندی پارامترهای محیطی)، یکی از مناسب‌ترین الگوریتم‌هایی که توانایی بررسی این نوع داده‌ها را در قالب پیش‌بینی و تفسیر و توصیف‌پذیری آنها دارد (نظارت شده)، درخت تصمیم رگرسیونی است[۳۲و۳۳]. روش انجام پژوهش در شکل ۷ نشان داده شده است.

درخت تصمیم رگرسیونی (توصیف): درخت تصمیم در بسیاری از کاربردها به عنوان یک راه حل قدرتمند برای مسائل طبقه‌بندی و پیش‌بینی استفاده می‌شود [۳۲]. درخت تصمیم می‌تواند برای تخمین داده‌های پیوسته یا طبقه‌بندی داده‌های گسسته استفاده شود.

روش درختان طبقه‌بندی و رگرسیون (CART) برای هر دو نوع درخت رگرسیونی و دسته‌بندی کاربرد دارد [۳۳]. همچنین ارزیابی صحت مدل ساخته شده دارای اهمیت زیادی است؛ بر این اساس از روش K-Fold که زیر مجموعه روش اصلی Cross Validation می‌باشد، استفاده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]



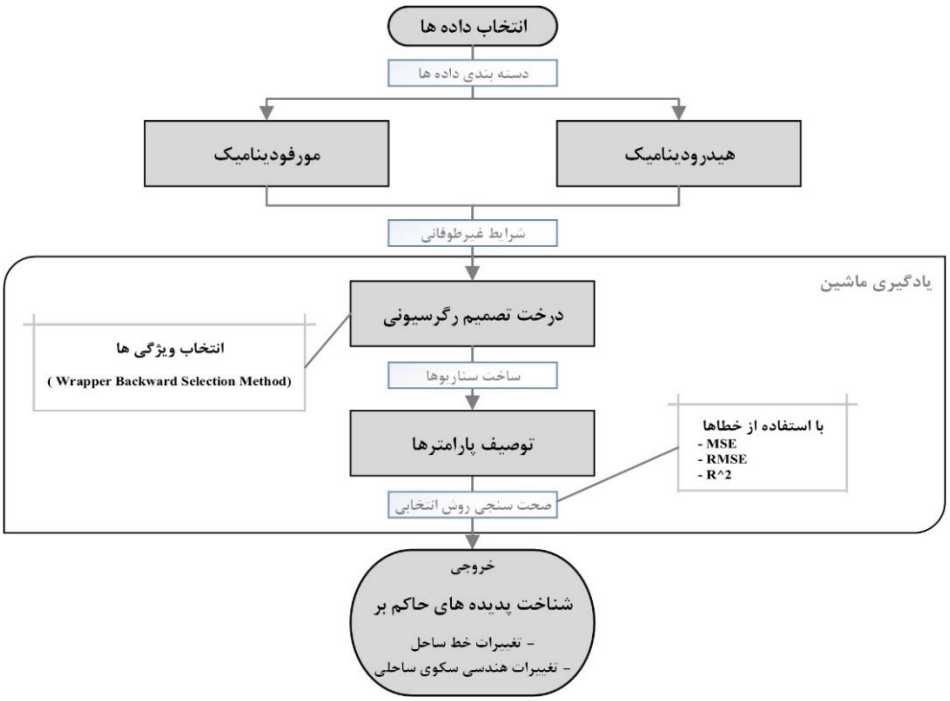
پارامترهای هیدرودینامیک

تعریف	پارامتر	تعریف	پارامتر	تعریف	پارامتر
افزایش سطح آب دریا	SLR	پریود موج حداکثر	Tp	ارتفاع موج مشخصه	Hs
تیزی موج	H/L	انرژی موج	E	ارتفاع موج متوسط	Hmean
طول موج	L	توان موج	P	ارتفاع موج حداکثر	Hmax
		اندیس شکست	ϛ	پریود موج متوسط	Tmean

پارامترهای مورفودینامیک

تعریف	پارامتر	تعریف	پارامتر	تعریف	پارامتر
موقعیت افقی پنجه تپه ساحلی	Δx DT	ارتفاع پنجه تپه ساحلی	DT Height	عرض سکوی ساحلی	BW
تغییرات خط ساحل	Δx Shoreline	تغییرات ارتفاعی پنجه تپه ساحلی	Δy DT	تغییرات عرض سکوی ساحلی	ΔBW
موقعیت افقی پنجه تپه ساحلی	Xloc DT	تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی	Δy BC	شیب بین تاج سکوی ساحلی و خط ساحل	Berm Slope
		موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی	Xloc BC	شیب بین پنجه تپه ساحلی و خط ساحل	Beach Slope
		تغییرات افقی تاج سکوی ساحلی	Δx BC	ارتفاع تاج سکوی ساحلی	BC Height

شکل ۶- نیمرخ شماتیک عرضی ساحلی و دسته‌بندی داده‌های هیدرودینامیک و مورفودینامیک



شکل ۷- فلوچارت روش انجام پژوهش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

معیارهای ارزیابی (خطاها): استفاده از روش‌های مقایسه‌ای بین نتایج خروجی و مقادیر واقعی توابع هدف، درک بهتر و واضح‌تری از تحلیل نتایج را ارائه می‌دهد. میانگین مربعات خطا (MSE) یکی از پرکاربردترین معیارها است که هم در آموزش و هم در مقایسه مدل‌ها استفاده می‌شود. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) از جذر MSE حاصل می‌شود. دلیل استفاده از آن، یکسان بودن بُعد و مقیاس آن با ویژگی هدف است. معیار ضریب تعیین یا امتیاز (R^2) نیز جهت مقایسه مدل‌ها و گزارش نتایج استفاده می‌شود. معادلات خطاهای بیان شده به صورت زیر می‌باشد:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - y_i\right)^2 \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - y_i\right)^2} \quad (۲)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - y_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2} \quad (۳)$$

در معادلات بالا n تعداد داده‌ها، x_i مقادیر مشاهده شده، yi مقدار پیش‌بینی شده و $\overline{x}$ میانگین داده‌های مشاهداتی هستند.

۳- بررسی داده‌ها و نتایج

شناخت عوامل محیطی و تعیین تاثیر پذیری عارضه‌های ساحلی از آنها در بررسی و تحلیل هرچه بهتر این عارضه‌ها، بسیار با اهمیت است. بر این اساس در این بخش به بررسی داده‌ها و تحلیل نتایج الگوریتم‌ها و توصیف پدیده‌های محیطی (پارامترهای هیدرودینامیک و مورفودینامیک) پرداخته شده است. بدین ترتیب با توجه به هرتابع هدفی که تعریف شده است، پارامترهای محیطی مرتبط با آن بررسی شده و با توجه به ماهیت هر پارامتر، عواملی که نقشی (اثری) در تغییرات تابع هدف نداشته کنار گذاشته شده است.

۳-۱- توصیف فیزیکی پدیده‌ها

تغییرات خط ساحل: به جهت انجام محاسبات و بررسی تغییرات خط ساحل، در گام اول با تحلیل و دیدگاه مهندسی سواحل، پارامترهایی را که نسبت به یکدیگر همپوشانی داشته و یا ارتباط مستقیمی با تابع هدف نداشته را حذف نموده تا از پیچیدگی محاسبات کاسته و امکان تحلیل نادرست کاهش یابد. بر این اساس پارامترهای موثر و مرتبط در تغییرات خط ساحل در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای محیطی مورد نظر در بررسی تغییرات خط ساحل

دسته بندی	پارامترها
پارامترهای مورفودینامیک	ΔBW, Berm Slope, Δx BC
پارامتر های هیدرودینامیک	H_{max}, H/L, E, P, ζ, SLR

با توجه به تعداد پارامترها، جهت بررسی ماهیت فیزیکی آنها و تعیین ارزش و اهمیت هر یک در شبکه درخت تصمیم، به روش Wrapper Backward Feature Selection، ۹ سناریوی اصلی درنظر گرفته شد.

بر این اساس، به ترتیب از بیشترین تعداد در هر مرحله یک پارامتر حذف شده و با توجه به بهترین نتیجه، وارد مرحله بعدی شده تا در نهایت ترتیب اهمیت پارامترها مشخص گردد. برطبق سناریوهای اصلی، در مجموع ۴۵ زیر سناریو تشکیل شد. نمودار نتایج درخت بهینه برای سناریوهای منتخب در هر مرحله در شکل ۸ نشان داده شده است.

در گراف‌های نشان داده شده در شکل ۸، محور افقی تعداد درون یابی، محور عمودی حداقل MSE، نمودار رنگ تیره مربوط به مقادیر مشاهده شده و نمودار رنگ روشن مربوط به داده‌های تخمین زده شده می‌باشند. همچنین تک نقطه‌های مشخص شده با علامت مربع و دایره، به ترتیب بهترین هایپرپارامتر و کمترین خطای حاصل شده جهت تخمین مقادیر را نشان می‌دهند. در جدول ۲ و نمودار شکل ۹ مقادیر اندازه برگ مدل و خطاهای مرتبط با بهترین هایپرپارامتر حاصل شده از سناریوهای منتخب نشان داده شده است. جهت ارزیابی صحت مدل ها از روش K-Fold در حالت ۵ گروه دسته‌بندی (۴ دسته آموزش و ۱ دسته آزمایش) بهترین نتایج حاصل شده است.

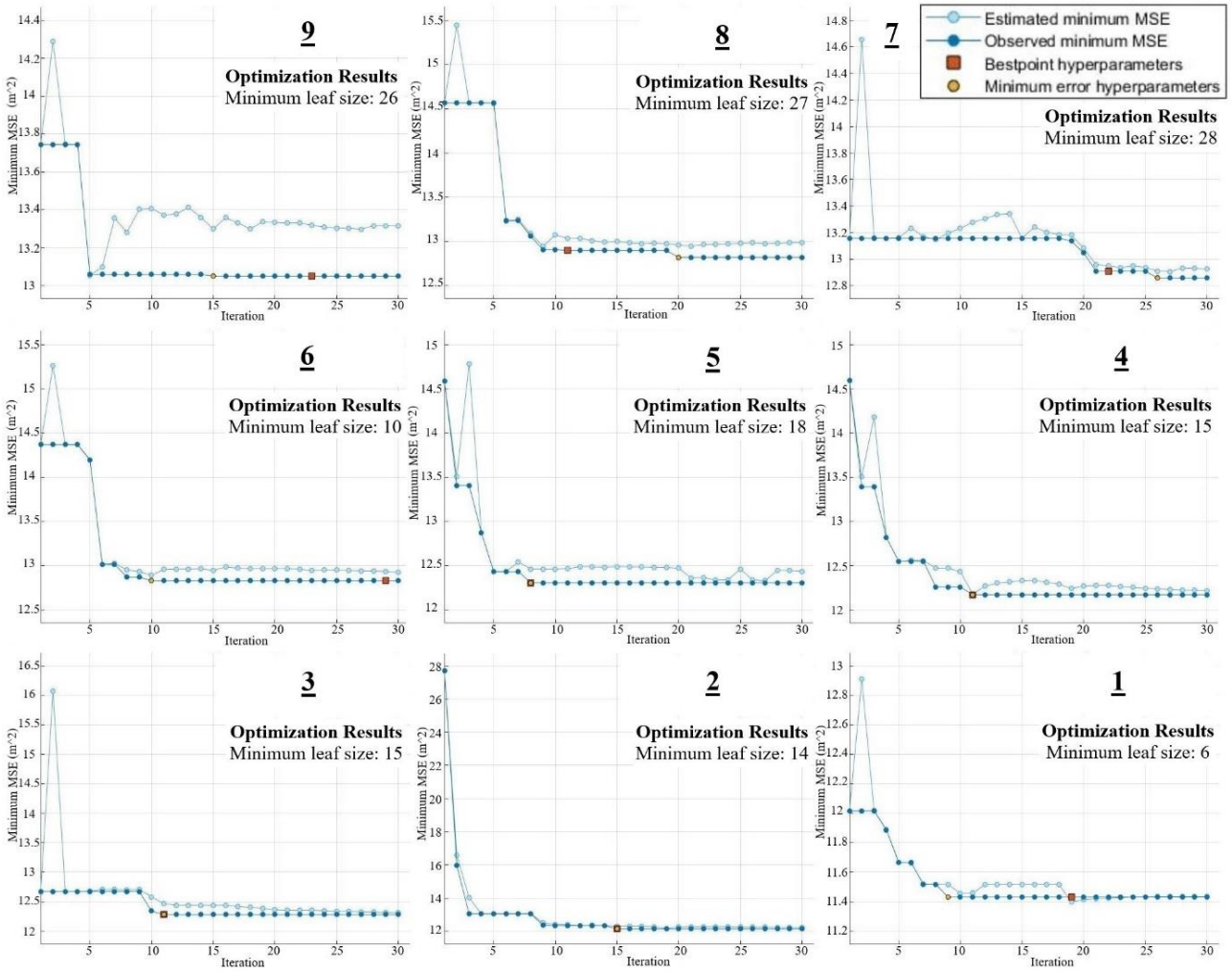
جدول ۲- خطاهای مرتبط با بهترین هایپرپارامتر حاصل شده از سناریوهای منتخب در تحلیل تغییرات خط ساحل

سناریوی اصلی	شماره کد مدل	پارامترها	RMSE (m)	R^2 %
9	A1	ΔBW; Berm Slope; SLR; ζ; P; H_{max}; E; H/L; Δx BC	3.636	80
8	A10	ΔBW; Berm Slope; SLR; ζ; P; H_{max}; E; H/L	3.591	81
7	A12	ΔBW; Berm Slope; SLR; ζ; P; H_{max}; E	3.597	81
6	A20	ΔBW; Berm Slope; SLR; ζ; P; H_{max}	3.595	81
5	A26	ΔBW; Berm Slope; SLR; ζ; P	3.508	82
4	A32	ΔBW; Berm Slope; SLR; ζ	3.489	82
3	A37	ΔBW; Berm Slope; SLR	3.504	82
2	A41	ΔBW; Berm Slope	3.485	82

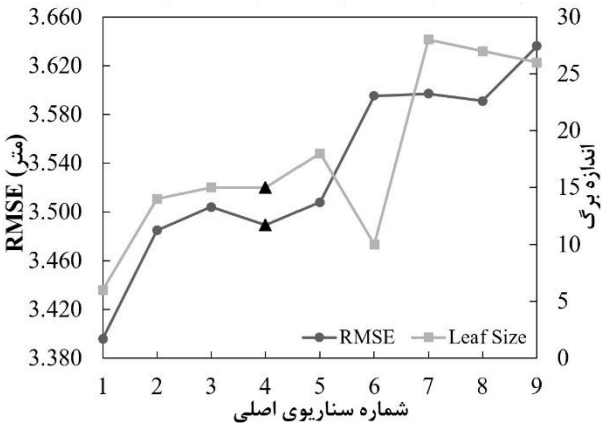
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

83	3.396	ΔBW		A45	1



شکل ۸- نمودار نتایج سناریوهای منتخب شماره ۱ تا ۹



شکل ۹- نمودار مقادیر اندازه برگ مدل و RMSE مرتبط با بهترین هایپرپارامتر حاصل شده از سناریوهای منتخب

برطبق نمودارهای شکل ۸ و جدول ۲ مشاهده می‌شود که در سناریوی منتخب شماره ۹ مقادیر تخمین زده شده در مسیر درون یابی به مقادیر مشاهده شده نزدیک نشده و رفتار خود را دنبال می‌کند؛ همچنین خطا و مدل درختی پیچیدگی تقریبا بالایی را نشان می‌دهد. همین روند با بهبود نسبی تا سناریوی شماره ۷ پیش رفته و در سناریوهای شماره ۶ تا ۴ از پیچیدگی مدل و خطا کاسته شده و نمودار درون یابی نیز الگوی حرکتی بهتری را نشان می‌دهد و مقادیر تخمین زده شده به صورت قابل قبولی به الگوی مقادیر مشاهداتی نزدیک می‌شود. اما از سناریوی شماره ۳ تا ۱ علی رغم اینکه خطا و پیچیدگی مدل کاهش یافته، اما نمودارها به شدت به هم نزدیک شده که این به معنی یادگیری بیش از حد خوب مدل است (خصوصا در سناریوهای شماره ۲ و ۱ که مشهودتر است) که روندی طبیعی نبوده زیرا تنوع پارامترها کاسته شده و مهمترین گزینه‌ها در مدل باقی مانده‌اند. همانطور که در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود، بهترین الگوی رفتاری از برآیند دو عامل خطا و پیچیدگی مدل، سناریوی شماره ۴ مناسب‌ترین و بهترین حالت برای درک رفتار تغییرات خط ساحل به کمک پارامترهای محیطی می‌باشد. مقدار ضریب R^2 نیز در تمام سناریوها در محدوده‌ای قابل قبول و حدود ۸۲٪ بوده است. بر این اساس موثرترین پارامترها جهت بررسی و توصیف تغییرات خط ساحل به ترتیب ΔBW،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

Berm Slope، SLR و ζ خواهند بود که دو پارامتر اول از نوع مورفودینامیک و دو پارامتر بعدی از نوع هیدرودینامیک می‌باشند.

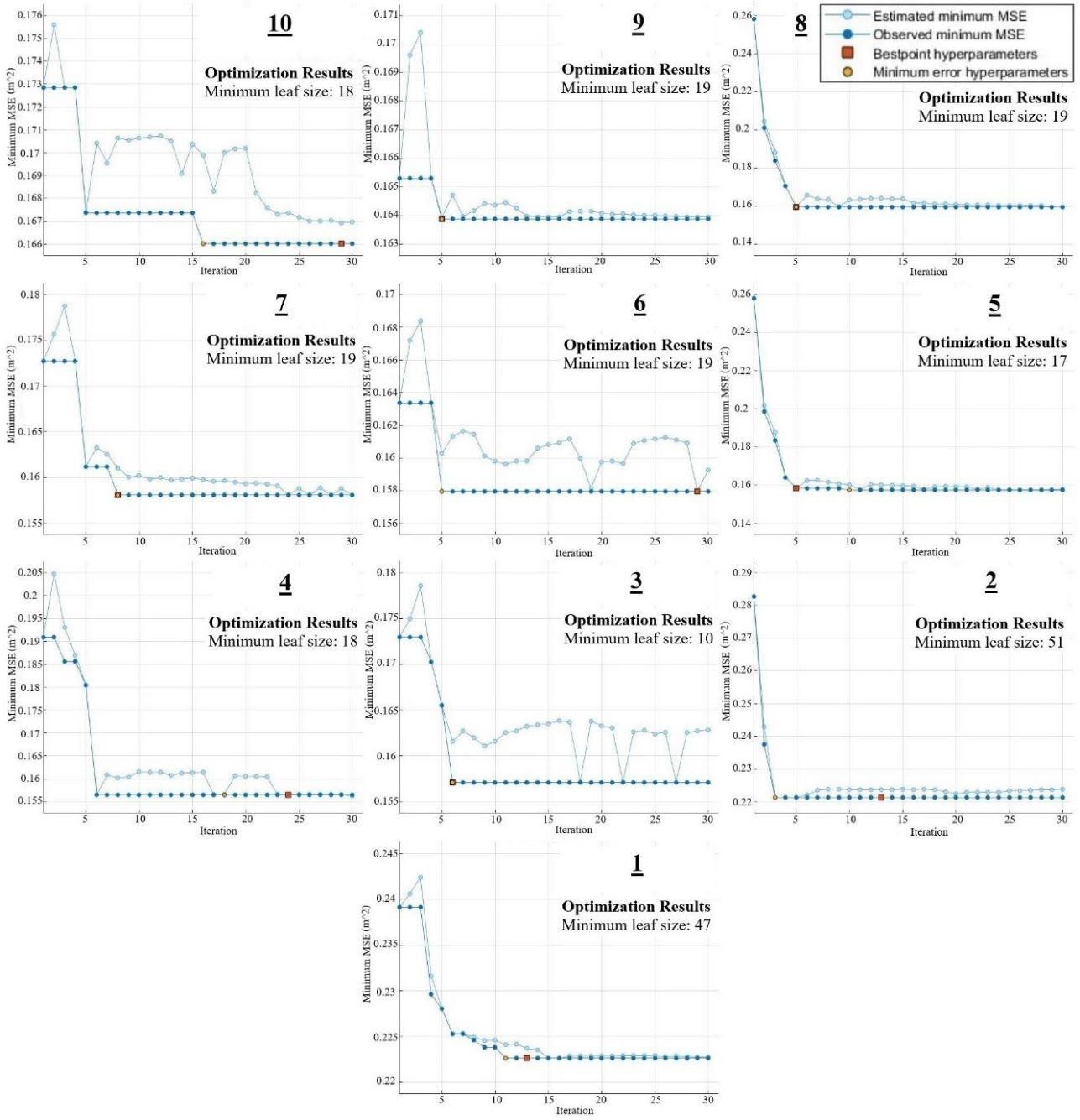
تغییرات تاج سکوی ساحلی: با توجه به شکل ۷، جهت بررسی سکوی ساحلی دو مؤلفه تغییرات ارتفاعی و موقعیت افقی تاج آن در نظر گرفته شده است:

تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی: به جهت انجام محاسبات و بررسی تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی، پارامترهای مؤثر انتخاب شدند که در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- پارامترهای محیطی مورد نظر در بررسی تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی

دسته بندی	پارامترها
پارامترهای مورفودینامیک	BW, Berm Slope, BC Height, Δx Shoreline, Δx BC
پارامتر های هیدرودینامیک	H_{mean}, L, P, ζ, SLR

در جدول ۳ و نمودار شکل ۱۱ مقادیر اندازه برگ مدل و خطاهای مرتبط با بهترین هایپرپارامتر حاصل شده از سناریوهای منتخب نشان داده شده است.



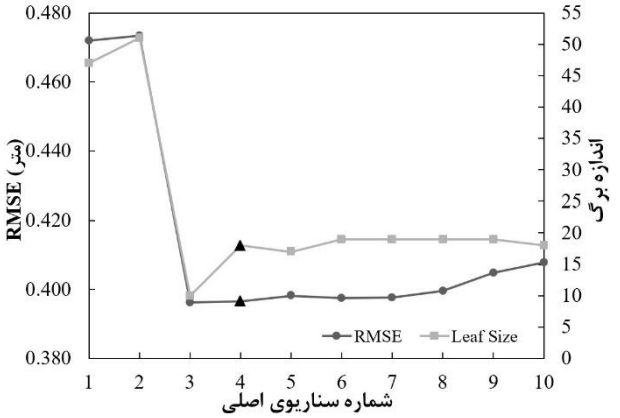
شکل ۱۰- نمودار نتایج سناریوهای منتخب شماره ۱ تا ۱۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

جدول ۴- خطاهای مرتبط با بهترین هایپرپارامتر حاصل شده از سناریوهای منتخب در تحلیل تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی

R^2%	RMSE (m)	پارامترها	شماره کد مدل	سناریوی اصلی
26	0.408	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR, ζ, Berm Slope, BW, L	A1	10
26	0.405	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR, ζ, Berm Slope, BW	A3	9
45	0.400	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR, ζ, Berm Slope	A16	8
48	0.398	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR, ζ	A25	7
48	0.397	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR	A31	6
46	0.398	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}	A38	5
48	0.397	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P	A42	4
47	0.396	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC	A47	3
46	0.473	BC Height, Δx Shoreline	A53	2
45	0.472	BC Height	A55	1



شکل ۱۱- نمودار مقادیر اندازه برگ مدل و RMSE مرتبط با بهترین هایپرپارامتر حاصل شده از سناریوهای منتخب

برطبق نمودارهای شکل ۱۰ و ۱۱ و نیز جدول ۴ مشاهده می‌شود که در سناریوهای ۱ و ۲، RMSEو پیچیدگی مدل به نسبت سایر سناریوها بالا است. از سناریوی شماره ۳، RMSEو پیچیدگی مدل بهبود قابل توجهی داشته و این روند با نسبت تقریبا ثابتی تا سناریوی شماره ۱۰ ادامه پیدا کرده است. اما کاهش قابل توجه در مقدار R^2 برای سناریوهای ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که این موضوع در حذف نمودن این دو قابل استناد است. در مجموع برای مدل ساخته شده مقدار R^2 بالایی حاصل نشده اما با توجه به سایر مقادیر خطاها و نیز نمودارهای درون یابی، می توان آن را در محدوده قابل پذیرش قرار داد. در مجموع بهترین سناریو شماره ۳ است اما با توجه به اینکه اهمیت پارامترهای هیدرودینامیک قابل اغماض نبوده و وجود آنها در بررسی و توصیف پدیده‌های حاکم با اهمیت می‌باشد، می‌توان با قبول این موضوع سناریوی شماره ۴ را به عنوان سناریوی منتخب لحاظ نمود. همانطور که مشاهده می‌شود RMSE در این سناریو ۰,۳۹۷ متر و Leaf Size نیز ۱۸ بوده که اندکی بالاتر از سناریوی ۳ است و مقدار R^2 نیز بالاترین مقدار در بین سناریوهای منتخب می‌باشد. بر این اساس موثرترین پارامترها جهت بررسی و توصیف تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی به ترتیب BC Height ، Δx Shoreline، Δx BCو P خواهند بود که سه پارامتر اول از نوع مورفودینامیک و پارامتر چهارم از نوع هیدرودینامیک می‌باشند.

موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی: پارامترهای مؤثر انتخابی جهت انجام محاسبات و بررسی موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی، در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- پارامترهای محیطی مورد نظر در بررسی موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی

دسته بندی	پارامترها
پارامترهای مورفودینامیک	BW, Berm Slope, BC Height, Δx Shoreline, Δy BC
پارامتر های هیدرودینامیک	H_{mean}, E, P, ζ, SLR

در این بخش نیز همانند دو بخش قبل و با توجه به تعداد پارامترهای موجود، ۱۰ سناریوی اصلی درنظر گرفته شد. برطبق سناریوهای اصلی، در مجموع ۵۵ زیر سناریو تشکیل شد. نمودار نتایج درخت بهینه برای سناریوهای منتخب در هر مرحله در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در جدول ۶ و نمودار شکل ۱۳ مقادیر اندازه برگ مدل و خطاهای مرتبط با بهترین هایپرپارامتر حاصل شده از سناریوهای منتخب نشان داده شده است.

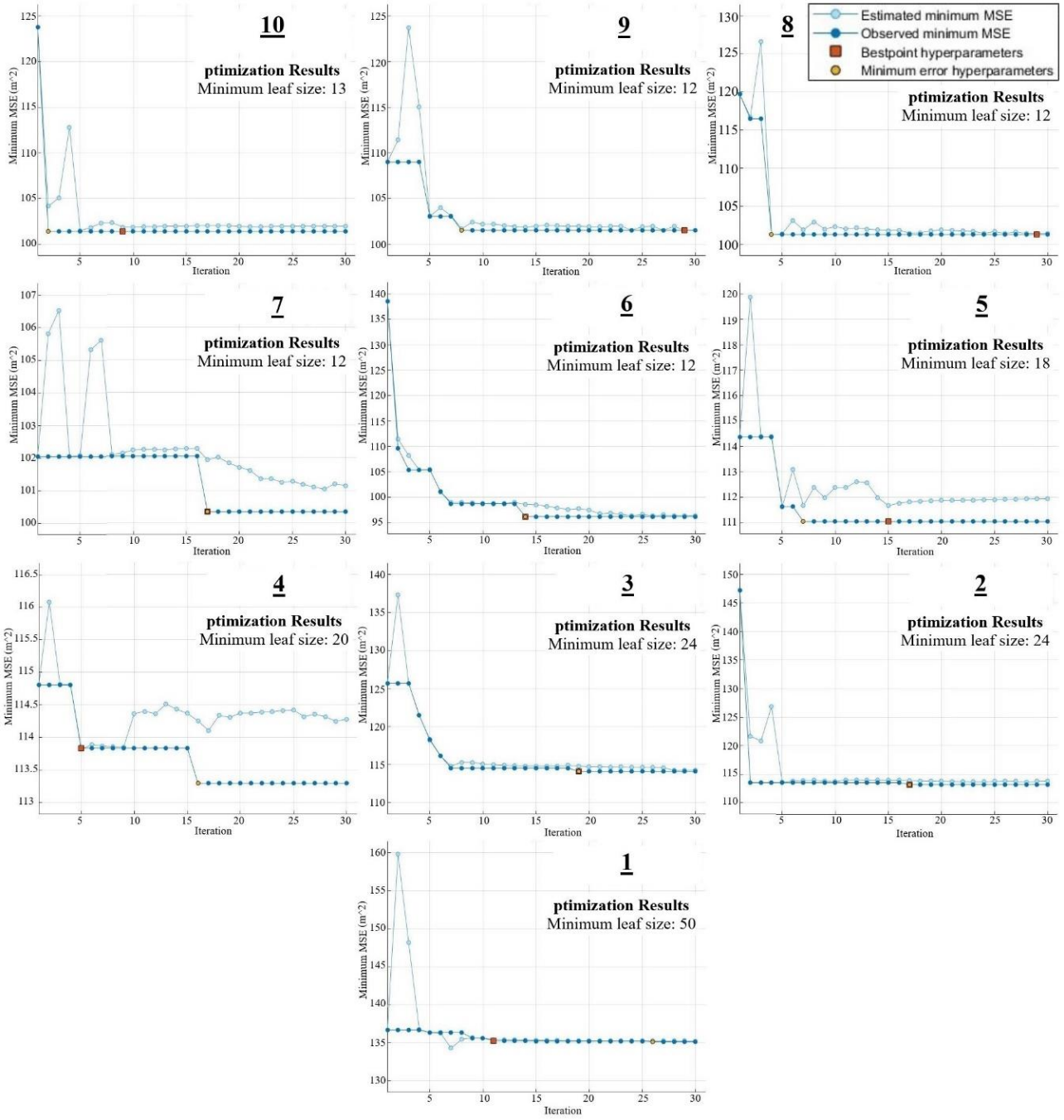
جدول ۶- خطاهای مرتبط با بهترین هایپرپارامتر حاصل شده از سناریوهای منتخب در تحلیل موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی

R^2%	RMSE (m)	پارامترها	شماره کد مدل	سناریوی اصلی
66	10.098	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR, ζ, Berm Slope, BW, L	A1	10
68	10.076	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR, ζ, Berm Slope, BW	A4	9
67	10.064	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR, ζ, Berm Slope	A19	8
67	10.017	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR, ζ	A21	7
67	9.807	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}, SLR	A30	6
66	10.585	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P, H_{mean}	A37	5
65	10.670	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC, P	A42	4
64	10.683	BC Height, Δx Shoreline, Δx BC	A49	3
65	10.640	BC Height, Δx Shoreline	A53	2

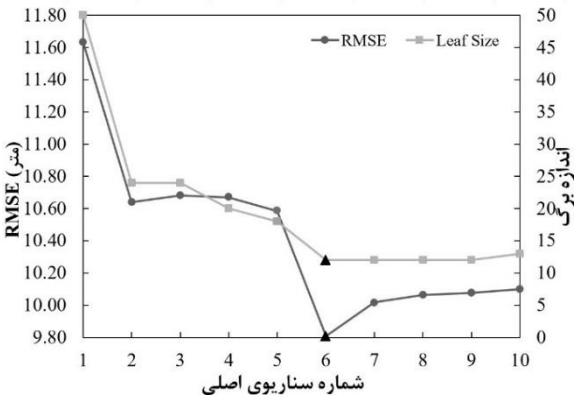
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

58	11.632	BC Height			A55	1



شکل ۱۲- نمودار نتایج سناریوهای منتخب شماره ۱ تا ۱۰



شکل ۱۳- نمودار مقادیر اندازه برگ مدل و RMSE مرتبط با بهترین هایپرپارامتر حاصل شده از سناریوهای منتخب

برطبق نمودارهای شکل ۱۲ و ۱۳ و نیز جدول ۶ مشاهده می‌شود که مقادیر RMSE و پیچیدگی مدل از سناریوی ۱ تا ۶ کاهشی بوده و از سناریوی ۷ تا ۱۰ با روند اندکی مجددا به سمت افزایش پیش می‌رود. سناریوی ۱، R^2 پایین و پیچیدگی بالایی دارد و سناریوهای ۲ تا ۵ نیز دارای RMSE بالایی هستند. مقدار R^2 در مجموع سناریوها قابل قبول و در محدوده ۶۷ درصد قرار دارد. سناریوی ۶ را با ۹,۸۰۷RMSE متر و Leaf Size برابر ۱۲ می‌توان به عنوان بهترین سناریو در نظر گرفت. بر این اساس

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

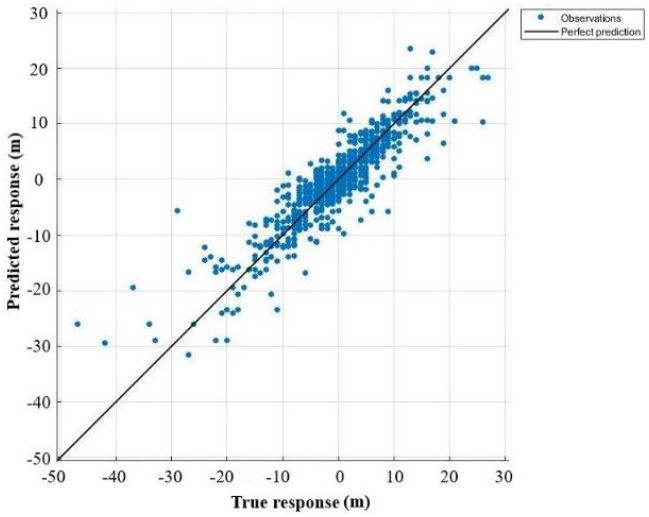
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

موثرترین پارامترها جهت بررسی و توصیف پارامتر موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی به ترتیب BW، Berm Slope، Δy BC، BC Height، E و SLR خواهند بود که چهار پارامتر اول از نوع مورفودینامیک و دو پارامتر بعدی از نوع هیدرودینامیک می‌باشند.

۴- بحث و گفتگو

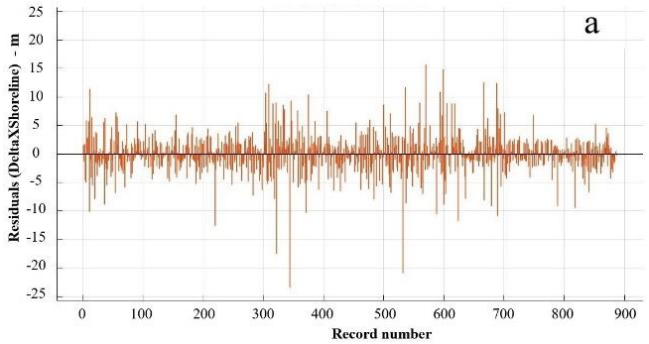
براساس نتایج و تحلیل‌های انجام گرفته از توصیف پارامترهای محیطی و اثرگذار و انتخاب بهترین سناریو و چینش پارامترها برای هر یک از توابع هدف، در این بخش به بررسی بیشتر این سناریوها پرداخته شده است.

تغییرات خط ساحل: در شکل ۱۴ پراکندگی مقادیر داده‌های اصلی با داده‌های دیده شده برای تغییرات خط ساحلی در مدل درخت تصمیم جهت مقایسه آنها آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود پاسخ‌های درست (محور افقی) و پاسخ‌های پیش‌بینی شده (محور عمودی) هماهنگی بسیار نزدیکی با یکدیگر داشته و بر خط ۴۵ درجه متمرکز می‌باشند و ضریب R^2 بالای ۸۰ درصد را نشان می‌دهد.



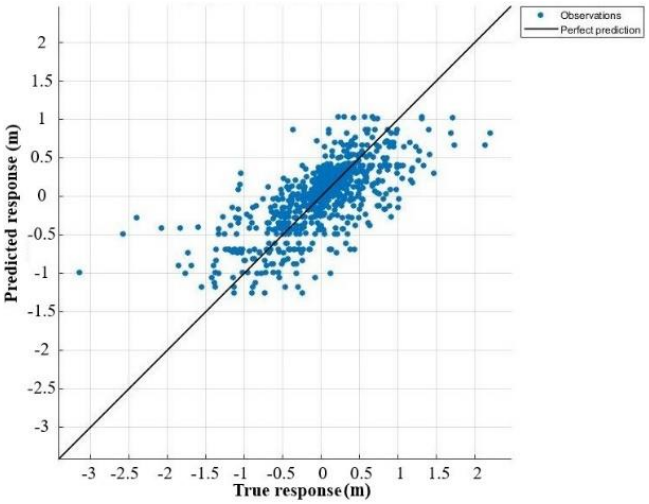
شکل ۱۴- پراکندگی داده‌های اصلی و پیش‌بینی شده تغییرات خط ساحل در مدل درخت تصمیم برای سناریوی شماره ۴ (سناریوی منتخب)

در شکل ۱۵ اختلاف خروجی‌های درخت تصمیم با داده‌های واقعی برای تغییرات خط ساحل نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، محور افقی مربوط به تعداد داده‌ها و محور عمودی اختلاف مقادیر مدل با داده‌های واقعی است؛ اختلاف داده‌ها عمدتا در بازه کمتر از ۳,۵ متر بوده (طبق جدول ۲) و با توجه به دامنه تغییرات خط ساحل که طبق داده‌های اولیه برابر با ۲۰ متر می‌باشد، رفتار نمودار منطقی و کاملا قابل قبول می‌باشد.



شکل ۱۵- اختلاف خروجی‌های درخت تصمیم با داده‌های واقعی برای تغییرات خط ساحل (نسبت اختلاف مقادیر به تعداد کل داده‌ها)

تغییرات تاج سکوی ساحلی: در شکل ۱۶ پراکندگی مقادیر پاسخ‌های درست با پاسخ‌های پیش‌بینی شده برای تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی در مدل درخت تصمیم نشان داده شده است. الگوی توزیع داده‌های پیش‌بینی شده در مدل همخوانی نسبتا مناسبی با داده‌های صحیح داشته و ضریب R^2 در حدود ۴۸ درصد را نشان می‌دهد.

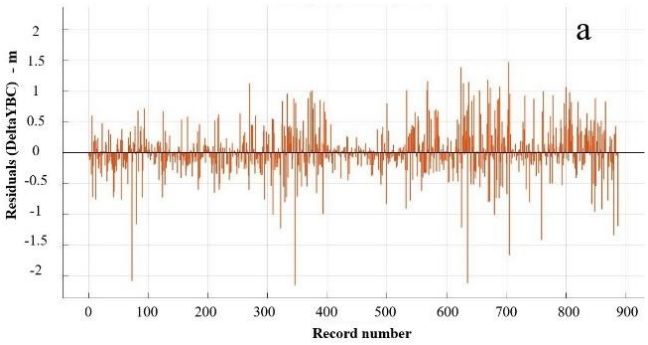


شکل ۱۶- پراکندگی داده‌های اصلی و پیش‌بینی شده تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی در مدل درخت تصمیم برای سناریوی شماره ۴ (سناریوی منتخب)

در شکل ۱۷ اختلاف خروجی‌های درخت تصمیم با داده‌های واقعی برای تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، اختلاف داده‌ها عمدتا در بازه کمتر از ۰,۵ متر بوده (طبق جدول ۴) و با توجه به دامنه تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی که طبق داده‌های اولیه برابر با ۱,۶ متر می‌باشد، رفتار نمودار تا حدودی قابل قبول است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

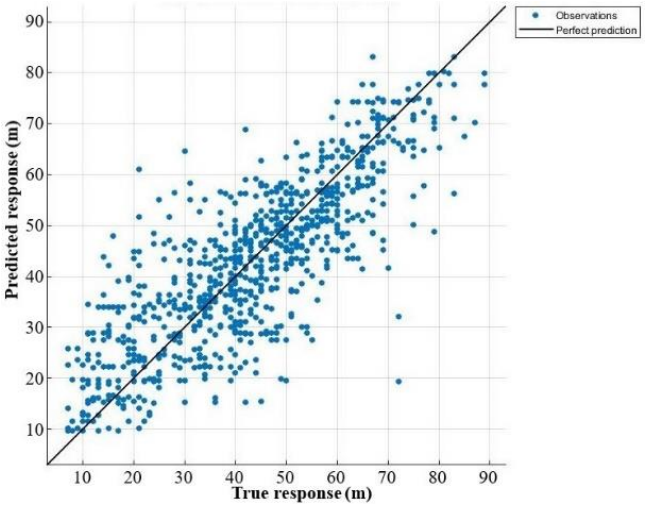
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]



شکل ۱۷- اختلاف خروجی‌های درخت تصمیم با داده‌های واقعی برای تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی (نسبت اختلاف مقادیر به تعداد کل داده‌ها)

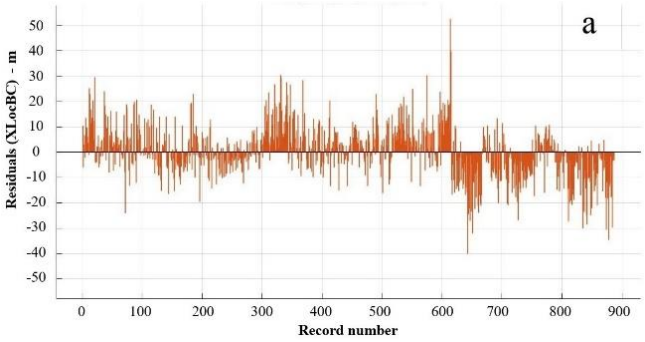
همچنین در شکل ۱۸ پراکندگی پاسخ‌های پیش‌بینی شده نسبت به پاسخ‌های صحیح برای موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی نشان داده شده است. الگوی توزیع داده‌های پیش بینی شده در مدل همخوانی مناسبی با داده‌های صحیح داشته و ضریب R^2 در حدود ۶۷ درصد را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در تابع هدف (موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی) این است که در نیمرخ شماره ۶ به جهت کم بودن عرض ساحل و نیز وضعیت خطوط انرژی (همانطور که در بخش معرفی منطقه مورد مطالعه اشاره شده است) طول عارضه سکوی ساحلی نیز کاهش یافته و موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی در بازه ۱۰ تا ۴۰ متر می‌باشد.

در شکل ۱۹ اختلاف خروجی‌های درخت تصمیم با داده‌های واقعی برای موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود، اختلاف داده‌ها عمدتا در بازه کمتر از ۱۰ متر است (طبق جدول ۶).



شکل ۱۸- پراکندگی داده‌های اصلی و پیش‌بینی شده موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی در مدل درخت تصمیم برای سناریوی شماره ۶ (سناریوی منتخب)

برخلاف مقادیر نیمرخ‌های شماره ۲ و ۴ که روند توزیع مناسب‌تری دارند، اختلاف مقادیر نیمرخ شماره ۶ بیشتر بازه منفی را شامل شده است که این موضوع در نتیجه شرایط اشاره شده در این ناحیه است؛ با این حال با توجه به دامنه تغییرات موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی که طبق داده‌های اولیه برابر با ۷۶ متر می‌باشد، رفتار نمودار قابل قبول است.



شکل ۱۹. اختلاف خروجی‌های درخت تصمیم با داده‌های واقعی برای موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی . الف) نسبت اختلاف مقادیر به تعداد کل داده‌ها

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با کمک روش یادگیری ماشین، ابتدا تغییرات خط ساحل مورد بررسی قرار گرفته، سپس تغییرات سکوی ساحلی بررسی شده است. پس از مرتب سازی داده‌ها، با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم رگرسیونی خطی، دسته‌بندی آنها جهت شناسایی اثرگذارترین پارامتر در تعیین تابع هدف مورد بررسی قرار گرفت؛ سپس ماهیت فیزیکی آنها در روند تغییرات توابع هدف، تحلیل و بررسی شد.

توصیف فیزیکی تغییرات خط ساحل: جهت بررسی ماهیت فیزیکی پارامترها، ۹ سناریوی اصلی و در مجموع ۴۵ زیر سناریو درنظر گرفته شد. با بررسی بهترین الگوی رفتاری از برآیند دو عامل خطا و پیچیدگی مدل، سناریوی اصلی شماره ۴ مناسب ترین حالت برای درک رفتار تغییرات خط ساحل در نظر گرفته شد. بر این اساس زیر سناریوی A32 با مقدار R2=82%، RMSE=3.489 و Leaf Size=15 به عنوان گزینه منتخب و همچنین موثرترین پارامترها جهت بررسی و توصیف تغییرات خط ساحل به ترتیب ΔBW، Berm Slope، SLR و ζ هستند. بر طبق نمودار پراکندگی (شکل۱۴)، پاسخ‌های درست و پاسخ‌های پیش‌بینی شده هماهنگی بسیار نزدیکی با یکدیگر داشته و بر خط ۴۵ درجه متمرکز می‌باشند؛ همچنین با بررسی نمودار اختلاف مقادیر خروجی‌ها (شکل ۱۵) مشاهده گردید که اختلاف داده‌ها عمدتا در بازه کمتر از ۳,۵ متر بوده و با توجه به دامنه تغییرات خط ساحل، رفتار نمودار منطقی و کاملا قابل قبول می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

توصیف فیزیکی تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی: در این بخش ۱۰ سناریوی اصلی و در مجموع ۵۵ زیر سناریو درنظر گرفته شد. با بررسی بهترین الگوی رفتاری از برآیند دو عامل خطا و پیچیدگی مدل، سناریوی اصلی شماره ۴ مناسب‌ترین حالت برای درک رفتار تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی در نظر گرفته شد. براین‌اساس زیر سناریوی A42 با مقدار R2=48%، RMSE=0.397 و Leaf Size=18 به عنوان گزینه منتخب و همچنین موثرترین پارامترها به ترتیب Δx ،BC Height Shoreline، Δx BC و P خواهند بود. بر طبق نمودار پراکندگی (شکل ۱۶)، الگوی توزیع داده‌های پیش بینی شده در مدل همخوانی نسبتا مناسبی با داده‌های صحیح داشته و همچنین با بررسی نمودار اختلاف مقادیر خروجی‌ها (شکل ۱۷) مشاهده گردید که اختلاف داده‌ها عمدتا در بازه کمتر از ۰٫۵ متر بوده و با توجه به دامنه تغییرات ارتفاعی تاج سکوی ساحلی، رفتار نمودار تا حدودی قابل قبول است.

توصیف فیزیکی موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی: در این بخش نیز، ۱۰ سناریوی اصلی و در مجموع ۵۵ زیر سناریو درنظر گرفته شد. با بررسی بهترین الگوی رفتاری از برآیند دو عامل خطا و پیچیدگی مدل، سناریوی اصلی شماره ۶ بهترین حالت برای درک رفتار موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی در نظر گرفته شد. بر این اساس زیر سناریوی A30 با مقدار R2=67% ، RMSE=9.807و Leaf Size=12به عنوان گزینه منتخب و همچنین موثرترین پارامترها به ترتیبBW ، Berm Slope ،Δy BC ،BC Height ، Eو SLR خواهند بود. بر طبق نمودار پراکندگی (شکل ۱۸)، الگوی توزیع داده‌های پیش‌بینی شده در مدل همخوانی مناسبی با داده‌های صحیح دارد. همچنین در نیمرخ شماره ۶ به جهت کم بودن عرض ساحل و نیز وضعیت خطوط انرژی، طول عارضه سکوی ساحلی نیز کاهش یافته و موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی در بازه ۱۰ تا ۴۰ متر می‌باشد. با بررسی نمودار اختلاف مقادیر خروجی‌ها (شکل ۱۹) مشاهده گردید که اختلاف داده‌ها عمدتا در بازه کمتر از ۱۰ متر است. برخلاف مقادیر نیمرخ‌های شماره ۲ و ۴ که روند توزیع مناسب‌تری دارند، اختلاف مقادیر نیمرخ شماره ۶ بیشتر بازه منفی را شامل شده است که این موضوع در نتیجه شرایط اشاره شده در این ناحیه است؛ با این حال در مجموع رفتار نمودار و اختلاف مقادیر در بازه قابل قبول می‌باشند.

با بررسی و تحلیل نتایج انجام پذیرفته از توصیف سه تابع تغییرات خط ساحل، تغییرات ارتفاعی و موقعیت افقی تاج سکوی ساحلی و نیز اثرگذاری پدیده‌های هیدرودینامیک و مورفودینامیک منطقه بر آنها با استفاده از روش درخت تصمیم رگرسیونی، می‌توان به این نتیجه رسید که مقادیر خروجی حاصل از این روش، در حد قابل قبول بوده و در شناخت پدیده‌های حاکم بر عارضه‌های ساحلی قابل اعتماد است و همچنین در بررسی تغییرات مورفودینامیک سکوی ساحلی و شناخت رفتار تعادلی آن، شکل هندسی و شیب اولیه آن نقش بسزایی را ایفا می‌نماید.

۶- تقدیر و تشکر

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق حاصل تلاش مداوم محققین بسیاری در سراسر جهان بوده است؛ جمع‌آوری داده‌های نیمرخ‌های ساحلی استرالیا در ارتباط با پروژه‌های تحقیقاتی مراکز مطالعاتی و دانشگاهی این کشور؛ مجموعه داده‌های هواشناسی از European Centre for Medium-Range Weather Forecasts؛ داده‌های تغییرات تراز آب دریاها از پایگاه AVISO. تلاش تمامی پژوهشگران مرتبط با داده‌های استفاده شده در این پژوهش جای تقدیر و سپاس فراوان دارد.

۷- منابع و مراجع

[1] Paprotny, D., Terefenko, P., Giza, A., Czapliński, P. and Vousdoukas, M.I. 2021. Future losses of ecosystem services due to coastal erosion in Europe. *Science of The Total Environment,* 760**,** 144310. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144310

[2] Flor-Blanco, G., Alcántara-Carrió, J., Jackson, D.W.T., Flor, G. and Flores-Soriano, C. 2021. Coastal erosion in NW Spain: Recent patterns under extreme storm wave events. *Geomorphology,* 387**,** 107767. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107767

[3] Harley, M.D., Masselink, G., Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., Valiente, N.G. and Scott, T. 2022. Single extreme storm sequence can offset decades of shoreline retreat projected to result from sea-level rise. *Communications Earth & Environment,* 3**,** 112. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00437-2

[4] Grossmann, F., Hurther, D., Sánchez-Arcilla, A. and Alsina, J.M. 2023. Influence of the Initial Beach Profile on the Sediment Transport Processes During Post-Storm Onshore Bar Migration. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 128**,** e2022JC019299. https://doi.org/10.1029/2022JC019299

[5] Heminway, S. S., Davis, E. H., Cohn, N., Skaden, J., Anderson, D. & Hein, C. J. 2023. MODELED CHANGES IN FOREDUNE MORPHOLOGY INFLUENCED BY VARIABLE STORM INTENSITY AND SEA-LEVEL RISE. *Coastal Sediments 2023*. WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0064

[6] Yin, C., Anh, D.T., Mai, S.T., Le, A., Nguyen, V.H., Nguyen, V.C., Tinh, N.X., Tanaka, H., Viet, N.T., Nguyen, L.D. and Duong, T.Q. 2021. Advanced Machine Learning Techniques for Predicting Nha Trang Shorelines. *IEEE Access,* 9**,**

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

A/B/C, 126**,** 103138. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103138
[16] McAllister, E., Payo, A., Novellino, A., Dolphin, T. and Medina-Lopez, E. 2022. Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Coastal Engineering*, 174**,** 104102. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104102
[17] Xu, G., Wei, H., Xue, S., Wang, J. and Li, Y. 2022. Predicting wave forces on coastal bridges using genetic algorithm enhanced ensemble learning framework. *Ocean Engineering*, 266**,** 112963. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112963
[18] Ferchichi, H., St-Hilaire, A., Ouarda, T.B. and Lévesque, B. 2022. Prediction of Coastal Water Temperature Using Statistical Models. *Estuaries and Coasts*, 45**,** 1909-1927. https://doi.org/10.1007/s12237-022-01070-0
[19] Bellinghausen, K., Hunicke, B. and Zorita, E. 2023. Short-term prediction of extreme sea-level at the Baltic Sea coast by Random Forests. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2023**,** 1-48. https://doi.org/10.5194/nhess-2023-21
[20] Billet, C., Bacino, G., Alonso, G. and Dragani, W. 2023. Shoreline Temporal Variability Inferred from Satellite Images at Mar del Plata, Argentina. *Water* [Online], 15. https://doi.org/10.3390/w15071299
[21] DALINGHAUS, C., COCO, G. and HIGUERA, P. 2023. USING GENETIC PROGRAMMING FOR ENSEMBLE PREDICTIONS OF WAVE SETUP. *Coastal Sediments 2023.* WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0177
[22] Turner, I.L., Harley, M.D., Short, A.D., Simmons, J.A., Bracs, M.A., Phillips, M.S. and Splinter, K.D. 2016. A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia. *Scientific Data*, 3**,** 160024. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.24
[23] Splinter, K.D., Harley, M.D. and Turner, I.L. 2018. Remote Sensing Is Changing Our View of the Coast: Insights from 40 Years of Monitoring at Narrabeen-Collaroy, Australia. *Remote Sensing* [Online], 10. https://doi.org/10.3390/rs10111744
[24] Jaramillo, C., González, M., Medina, R. and Turki, I. 2021. An equilibrium-based shoreline rotation model. *Coastal Engineering*, 163**,** 103789. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103789
[25] Jaramillo, C., Jara, M.S., Gonzalez, M. and Medina, R. 2021. A shoreline evolution model for embayed beaches based on cross-shore, planform and rotation equilibrium models. *Coastal Engineering*, 169**,** 103983. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103983
[26] Chataigner, T., Yates, M.L., Le Dantec, N., Harley, M.D., Splinter, K.D. and Goutal, N. 2022. Sensitivity of a one-line longshore shoreline change 98132-98149. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3095339
[7] Rodriguez-Galiano, V., Guisado-Pintado, E., Prieto-Campos, A. and Ojeda-Zujar, J. 2022. A machine-learning hybrid-classification method for stratification of multidecadal beach dynamics. *Geocarto International*, 37**,** 16534-16558. https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2110616
[8] Senechal, N., Peron, C. & Coco, G. 2023. ON THE USE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO EXPLORE MORPHOLOGICAL AND HYDRODYNAMIC PARAMETERS IN SHORELINE DYNAMICS. *Coastal Sediments 2023.* WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0036
[9] La Pena, E. G.-D., Coco, G., Whittaker, C. & Montano, J. 2023. A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK MODEL FOR SHORELINE CHANGE PREDICTION. *Coastal Sediments 2023.* WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0127
[10] Goldstein, E.B., Coco, G. and Plant, N.G. 2019. A review of machine learning applications to coastal sediment transport and morphodynamics. *Earth-Science Reviews*, 194**,** 97-108. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.022
[11] Beuzen, T. and Splinter, K. 2020. 28 - Machine learning and coastal processes. *In:*JACKSON, D. W. T. & SHORT, A. D. (eds.) *Sandy Beach Morphodynamics.* Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00028-X
[12] Shafaghat, M. and Dezvareh, R. 2021. Support vector machine for classification and regression of coastal sediment transport. *Arabian Journal of Geosciences*, 14**,** 2009. https://doi.org/10.1007/s12517-021-08360-0
[13] Casarosa, N., Luppichini, M., Bini, M., BERTON, A., MERLINO, S. and Paterni, M. 2022. A method based on beach profile analysis for shoreline identification. *Ninth International Symposium "Monitoring of Mediterranean Coastal Areas: Problems and Measurement Techniques".* Firenze University Press. https://doi.org/10.36253/979-12-215-0030-1.05
[14] Pradeep, J., Shaji, E., Chandran, S., Ajas, H., Chandra, S.V., Dev, S.D. and Babu, D.S. 2022. Assessment of coastal variations due to climate change using remote sensing and machine learning techniques: A case study from west coast of India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 275**,** 107968. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107968
[15] Chen, H., Yunus, A.P., Nukapothula, S. and Avtar, R. 2022. Modelling Arctic coastal plain lake depths using machine learning and Google Earth Engine. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]

model to the mean wave direction. *Coastal Engineering,* 172**,** 104025. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104025
[27] Beuzen, T., Splinter, K.D., Marshall, L.A., Turner, I.L., Harley, M.D. and Palmsten, M.L. 2018. Bayesian Networks in coastal engineering: Distinguishing descriptive and predictive applications. *Coastal Engineering,* 135**,** 16-30. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.01.005
[28] Zeinali, S., Dehghani, M. and Talebbeydokhti, N. 2021. Artificial neural network for the prediction of shoreline changes in Narrabeen, Australia. *Applied Ocean Research,* 107**,** 102362. https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102362
[29] Beuzen, T., Marshall, L. and Splinter, K.D. 2018. A comparison of methods for discretizing continuous variables in Bayesian Networks. *Environmental Modelling & Software,* 108**,** 61-66. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.007
[30] Oerlemans, S.C., Nijland, W., Ellenson, A.N. and Price, T.D. 2022. Image-Based Classification of Double-Barred Beach States Using a Convolutional Neural Network and Transfer Learning. *Remote Sensing* [Online], 14. https://doi.org/10.3390/rs14194686
[31] Harley, M., Ibaceta, R., Leaman, C., Splinter, K. & Turner, I. A. N. 2023. DATA-DRIVEN MODELING OF COASTAL STORM EROSION: NARRABEEN BEACH, AUSTRALIA. *Coastal Sediments 2023.* WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0028
[32] Kantardzic, M. 2019. *Data Mining: Concepts, Models, Methods, and Algorithms, 3rd Edition*, Wiley-IEEE Press.
[33] Breiman, L. 1984. Classification and Regression Trees (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.1201/9781315139470

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.44.4]